

SIMULACIONES *FULL-WAVE* EN LA BANDA DE MICROONDAS

Gross, Patricio¹; Vernieri, Julieta¹; Rodríguez, Guillermo^{1,2}

1- Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina.

2- Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina
Correo electrónico: patricio_gross@yahoo.com.ar

INTRODUCCION

Las comunicaciones en la banda de frecuencias de microondas (1 GHz a 300 GHz) tienen su aplicación fundamentalmente en enlaces terrestres punto a punto así como también en los sistemas de comunicación por satélite, sistemas de radar y sistemas de radioastronomía. En dicho rango de frecuencias, las longitudes de onda son del orden de centímetros y milímetros.

La utilización de antenas-lente, configuración que mejora la directividad y ganancia de radiación, tiene sus limitaciones en esta banda del espectro, debido precisamente al tamaño de sus componentes en relación con las longitudes de onda de trabajo. Para lograr una mejora en la ganancia las lentes a emplear resultan de diámetros de varias longitudes de onda, lo cual en términos absolutos para la banda de interés puede implicar lentes de gran diámetro (decenas de centímetros e inclusive metros) y por lo tanto gran peso y costo, siendo esta una de las limitaciones en su aplicación. Sin embargo el uso de nuevos materiales ha permitido reducir peso y con ello los costos en esta banda del espectro. Otra de las limitaciones que tienen este tipo de diseños y que hoy está siendo superada, es la de las simulaciones. Mientras el estudio de las lentes ópticas es comúnmente abordado desde la óptica geométrica, es decir a través del trazado de rayos, ello puede no resultar adecuado en la banda de microondas, ya que en este último caso las dimensiones de la lente son del orden de la longitud de onda o algo mayor. Al no ser el tamaño del objeto mucho mayor que la longitud de la onda que lo atraviesa, la óptica geométrica resulta muy limitada para observar los fenómenos que en él se presenten. Es por ello que en esta banda del espectro el empleo de software de simulación electromagnética basado en métodos *full-wave* es fundamental para el estudio de los conjuntos antena-lente. La posibilidad de contar con algoritmos computacionales confiables que permitan simular el comportamiento de los dispositivos y sistemas antes de que realmente se construyan, resulta imprescindible, no sólo porque permite ahorrar altísimos costos, sino porque habilita involucrarse en niveles de detalle y de optimización que serían incluso imposibles de realizar de manera experimental.

En particular, contamos con un novedoso código desarrollado en MATLAB que permite resolver problemas con el método *full-wave* [1]. Este código permite obtener gráficos de módulo y fase del campo eléctrico cercano y diagramas de radiación de campo lejano, realizando simulaciones en 2D, en tiempos menores a los que requieren los software de simulación electromagnética comerciales.

La disponibilidad de este código nos ha permitido la aplicación en varios estudios que han dado origen a diferentes trabajos publicados en congresos nacionales e internacionales [2-5].

El objeto de este trabajo es presentar los resultados de las simulaciones obtenidos en el diseño y caracterización de tres antenas-lente en la banda de microondas. Para lentes de diferente perfil esférico, hiperbólico y elíptico se analizan diversas variables tales como frecuencia, diámetro y distancia focal. Adicionalmente para la antena-lente de perfil hiperbólico se obtendrán a través de las simulaciones las características eléctricas del conjunto antena-lente (diagrama de radiación, ganancia, ancho de haz, relación frente-espalda, etc.).

SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA *FULL-WAVE*

Los problemas de electromagnetismo requieren de la resolución de las ecuaciones de Maxwell. Por lo general, las soluciones analíticas exactas sólo son posibles para una pequeña cantidad de casos donde la geometría que define el problema es simple. Son las llamadas soluciones canónicas.

Por otro lado, la utilización de técnicas numéricas ofrece la posibilidad de resolver potencialmente cualquier problema electromagnético. Este tipo de técnicas son las empleadas por el Electromagnetismo Computacional (CEM, por sus siglas en inglés), procedimiento que se utiliza para modelar y simular el comportamiento de los campos electromagnéticos en dispositivos o alrededor de estructuras.

La principal ventaja del CEM es que permite obtener datos a través del empleo de *softwares* de simulación sin necesidad de tener que construir dispositivos y realizar medidas, lo cual podría resultar altamente costoso. Con el desarrollo de las computadoras y la disminución del costo y los tiempos de cómputo, los métodos numéricos se han convertido en una herramienta fundamental para la resolución de problemas de electromagnetismo.

Una de las clasificaciones de los métodos numéricos más utilizada es:

- Métodos de baja frecuencia o también conocidos como “métodos *full-wave*”: estos métodos resultan convenientes cuando las dimensiones de las estructuras son comparables con la longitud de onda o más pequeñas.
- Métodos de alta frecuencia o también conocidos como “métodos asintóticos”: estos métodos resultan convenientes cuando las dimensiones de las estructuras son mucho mayores respecto a la longitud de onda, ya que en tales circunstancias es posible aplicar aproximaciones físicas al fenómeno electromagnético, tales como las técnicas del trazado de rayos, etc. La validez de tales aproximaciones aumenta asintóticamente con la frecuencia.

Los métodos *full-wave* permiten resultados más exactos, a costa de mayor tiempo de cómputo. En la banda de microondas para obtener buenos resultados, es fundamental contar con simulaciones basadas en métodos *full-wave*.

Como se mencionó previamente, para este trabajo se utilizó un código de simulación *full-wave*, basado en el método de los momentos (MoM), que tiene la ventaja de emplear muy bajos tiempos de cómputo.

ANTENAS LENTE

Una antena-lente es un sistema formado por una fuente electromagnética denominada alimentador, y una lente formada por uno (lente homogénea) o varios materiales dieléctricos (lente no-homogénea). Las lentes dieléctricas permiten transformar ondas esféricas provenientes del alimentador en ondas planas modificando su amplitud y fase permitiendo obtener mayor directividad y ganancia de radiación en comparación con el alimentador aislado.

En las antenas-lente se coloca el centro de fase del alimentador coincidente con el foco de la lente. La Figura 1 muestra un esquema de una antena-lente.

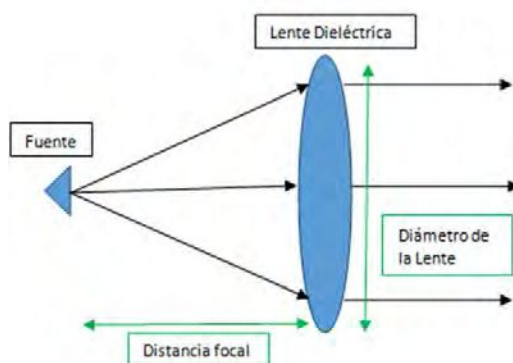


Figura 1 – Esquema de una antena lente

La ganancia máxima de la antena-lente es función de su diámetro, al igual que las antenas de apertura. Su ecuación está dada por:

$$G = \left(\frac{\pi D_a}{\lambda} \right)^2 \eta_t \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda de la fuente, D_a es diámetro de la lente y η_t es la eficiencia total que tiene en cuenta la eficiencia de iluminación y *Spillover*.

Existen muchas clasificaciones de lentes, tanto en función de su comportamiento: divergentes o convergentes; como en función de las características del material: homogéneas (la permitividad dieléctrica es la misma en toda la lente), y no-homogéneas y en función del perfil: esférica, elíptica, hiperbólica, escalonada (o de Fresnel), etc.

En el presente trabajo estudiamos tres antenas-lente de tipo convergentes, homogéneas con los siguientes perfiles: esférico, hiperbólico y elíptico.

La lente esférica puede diseñarse fácilmente a partir de la llamada ecuación del constructor de lentes [6] (Figura 2a). Una lente esférica de diseño simple es la de perfil plano-convexo. Utilizando la aproximación de lente delgada la ecuación que relaciona los parámetros de la lente plano-convexa está dada por:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \frac{1}{R} \quad (2)$$

donde f es la distancia focal, n es el índice de refracción del material empleado ($n = \sqrt{\epsilon_r}$), siendo ϵ_r la permitividad relativa del material y R es el radio de curvatura del perfil.

El perfil de una lente hiperbólica se puede diseñar a partir de la siguiente ecuación [7]:

$$\rho_1(\psi) = \frac{(n-1)f}{n \cos(\psi) - 1} \quad (3)$$

donde f es la distancia focal, n es el índice de refracción del material empleado y ρ_1 es la distancia desde el foco a la superficie hiperbólica de la lente (Figura 2b).

El perfil de una lente elíptica se puede diseñar a partir de la siguiente ecuación [7]:

$$\rho_2(\omega) = \frac{(n-1)f}{n - \cos \omega} \quad (4)$$

donde f es la distancia focal, n es el índice de refracción del material empleado y ρ_2 radio de curvatura de la superficie elíptica (Figura 2b).

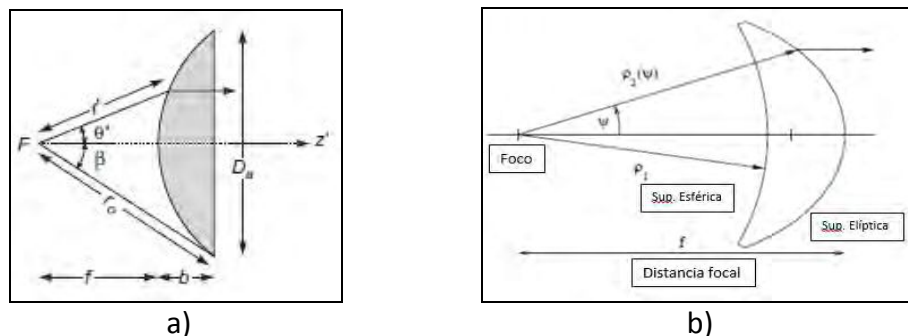


Figura 2 – a) Lente plano-convexa esférico o hiperbólico b) lente cóncavo-convexa perfil esférico o hiperbólico y elíptico

Es importante destacar que todas las ecuaciones que describen los perfiles (2-4) provienen de la óptica geométrica. Es decir, sólo tienen en cuenta la refracción y no tienen en cuenta la difracción de las ondas. Estas ecuaciones arrojan buenos resultados sólo cuando el tamaño de la lente es mucho mayor a la longitud de onda, lo cual no se cumple en el espectro de la banda de interés.

SIMULACIONES

El código utilizado para las simulaciones permite diseñar cualquier tipo de objeto dieléctrico a través de una función contraste y utilizar diferentes perfiles de alimentadores, obteniendo como resultado el módulo y la fase del campo electromagnético y el diagrama polar de campo lejano.

El diseño de una antena en general viene determinado por las características eléctricas deseadas (ganancia, ancho de haz principal, relación lóbulo principal a secundario, relación front to back, etc). Dependiendo del tipo de antena, existen varios parámetros que se pueden variar para lograr dichas características.

Partiendo de las ecuaciones para las diferentes lentes (2-4) se realizó un diseño inicial para luego, a partir de las simulaciones, verificar los parámetros eléctricos deseados.

Con el fin de comparar el efecto de los diferentes tipos de perfiles de lentes homogéneas se diseñaron las tres lentes manteniendo el diámetro de la lente constante para no modificar su ganancia teórica dada por (1).

Las lentes analizadas poseen un diámetro de 30 longitudes de onda (30λ) y su constante dieléctrica relativa es de un valor de cuatro ($\epsilon_r = 4$). Al estar definido el diámetro de la lente en función de la longitud de onda de la frecuencia del campo a irradiar, los resultados se hacen extensivos a cualquier frecuencia.

Las simulaciones se realizan para un espacio bidimensional cuadrado, cuyos lados se expresan en cantidades de longitud de onda, por lo que resulta adimensional con respecto a la frecuencia simulada. Este espacio es denominado cuadrado unidad y se subdivide en N por N puntos. En las simulaciones se utiliza un cuadrado unidad de 40 longitudes de onda (40λ) de lado, para un $N = 400$.

En la Figura 3 se observan, en una escala de colores, los diagramas de intensidad de campo cercano dentro y fuera de la lente en el espacio de simulación correspondientes a las lentes simuladas. En la Figura 4 se vuelcan los diagramas de fase de campo cercano.

Las lentes fueron irradiadas con una onda plana (antena en recepción), por lo que el color rojo-anaranjado (Figura 3), indicativo de las mayores intensidades, evidencia la ubicación aproximada del foco de la lente. La ubicación precisa del foco se obtiene a partir de los diagramas de perfil del módulo del campo en el eje focal, obtenidos también a través del código de simulación. Para el caso de la lente hiperbólica la distancia focal obtenida por simulación coincide con la determinada por la ecuación (3) [3]. Para las lentes esférica y elíptica la distancia focal medida se aparta de la determinada con (2) y (4) [3, 4].

Una observación importante arrojada del diagrama de fase son las dislocaciones de fase observada tanto en la lente de perfil esférico como la de perfil elíptico (Figuras 4 b y c). Dichas dislocaciones además coinciden con nulos en el diagrama de módulo, identificados por el color azul oscuro (Figuras 3 b y c). Dicha situación indica la existencia de vórtices ópticos, fenómeno ampliamente estudiado en ciencias ópticas [8] pero no así en antenas de microondas [5].

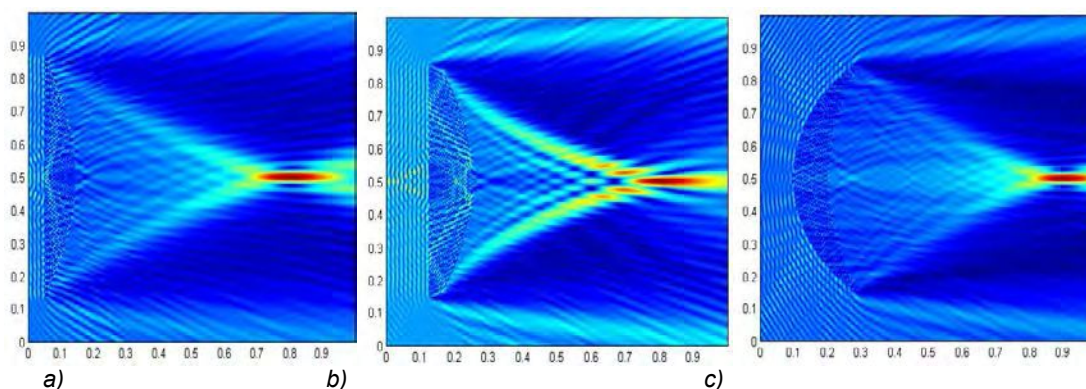


Figura 3 – Intensidad del campo dentro y fuera de la lente para la antena lente hiperbólica (a), esférica (b) y elíptica (c)

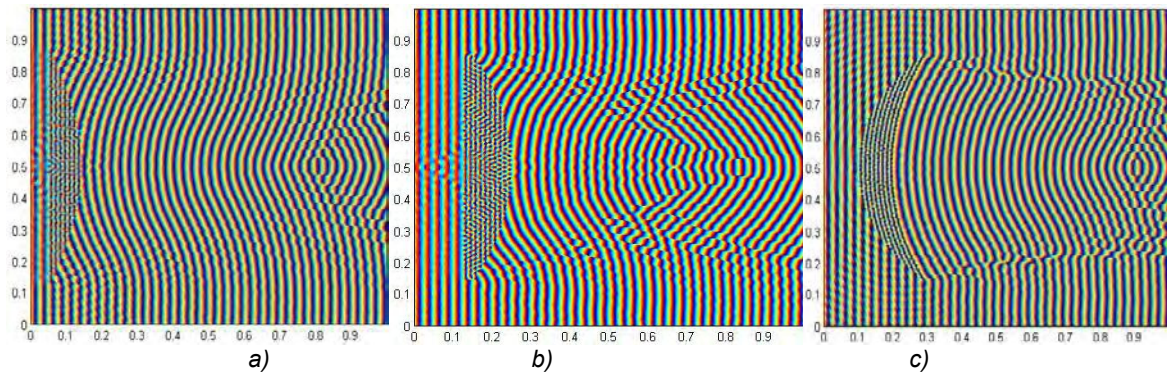


Figura 5 – Fase del campo dentro y fuera de la lente para la antena lente hiperbólica (a), esférica (b) y elíptica (c)

El código de simulación utilizado ofrece además el diagrama polar y cartesiano del campo radiado. De allí se pueden obtener los parámetros más importantes para cada antena-lente como: ganancia de la antena, ángulo de potencia mitad, relación lóbulos principales a secundarios y relación frente-espalda.

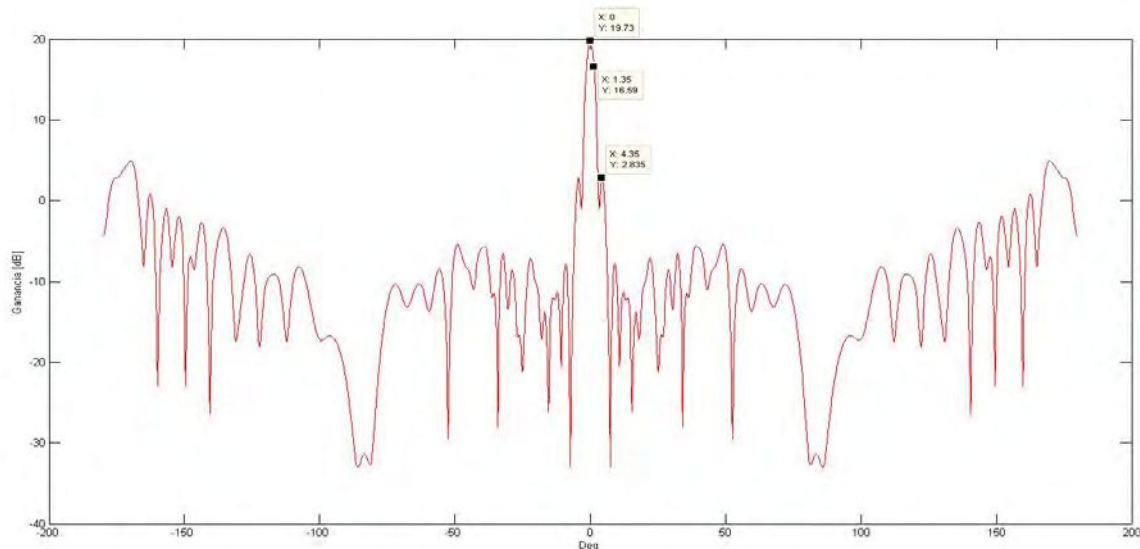


Figura 6 – Diag. Cartesiano del campo radiado lente hiperbólica

En el caso de la antena-lente hiperbólica, ésta fue irradiada con un alimentador del tipo cardiode, volcándose en la Figura 6 el diagrama cartesiano del campo radiado. A partir del diagrama se obtuvieron los siguientes valores característicos del conjunto antena-lente: ganancia 19,73 dB; ángulo de potencia mitad 2,5° y relación lóbulos principales a secundarios 17 dB.

CONCLUSIONES

Mediante el empleo del software de simulación desarrollado en MATLAB, el cual aplica un método *full-wave*, fue posible diseñar y analizar los parámetros de antenas-lente de un diámetro de gran tamaño, obteniendo resultados en tan sólo pocos segundos.

Se simularon diferentes tipos de antenas-lente, obteniendo características importantes del campo cercano tales como la determinación del punto focal para cada lente, con una mayor precisión que la arrojada por las ecuaciones teóricas, basadas en la óptica geométrica. Así mismo, en dos de los casos se detectó el fenómeno de vórtices ópticos, lo cual no hubiera sido posible con los métodos asintóticos, tales como la óptica geométrica.

Desde el punto de vista de los parámetros típicos de antenas, se han podido determinar para la antena-lente de perfil hiperbólico la ganancia, el ángulo de potencia mitad y la relación lóbulos principales a secundarios.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Vico F., Greengard L., Ferrando M.. "Fast convolution with free-space Green's functions". Journal of Computational Physics, Volume 323, 15 October 2016.
- [2] Gross P., Vico Bondia F., Bava J.A., Bataller M.F., Romeu Robert, "Application of new simulation code for 2D microwave lens study". XXXII Simposium Nacional de la Union Cientifica Internacional de Radio, URSI 2017, Cartagena, España, 6 - 8 September, 2017.
- [3] Gross P. Vernieri J., Vico F., Bava A., Ferrando Bataller M., "Lens Antennas Focus Determination Using Full-Wave Simulation", 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), Londres, 9-13 abril 2018.
- [4] Gross P. Vernieri J., Vico F., Bava A., Ferrando Bataller M., "Análisis de las características de Antenas-lente en microondas mediante método full-wave" ARGENCON 2018, Tucumán, Argentina, 6-8 Junio, 2018.
- [5] P. Gross, J. Vernieri, F. Vico Bondia, J. Alberto Bava, M.F. Bataller, "Study of Optical Vortexes in Lens Antennas", XVII Workshop on Information Processing and Control, Mar del Plata, Argentina, 20-22 September, 2017.
- [6] Geoffrey Brooker. "Modern Classical Optics". OUP Oxford, 24 jul. 2003.
- [7] Petr Piksa, Stanislav Zvanovec, Petr Ccerny. "Elliptic and Hyperbolic Dielectric Lens Antennas in mm-Waves". Radioengineering, VOL. 20, NO. 1, April 2011.
- [8] Basistiy, V A Pas'ko, V V Slyusar, M S Soskin and M V Vasnetsov. "Synthesis and analysis of optical vortices with fractional topological charges". Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, Volume 6, Number 5. 19 April 2004.